

Absorción de nutrientes de la pimienta negra (*Piper nigrum*) al inicio de su producción

Nutrient uptake of black pepper (*Piper nigrum*) at the onset of production

Liliana Lisbeth Zúñiga Sánchez¹, Rodrigo Alberto Saquicela Rojas², Olga Benigna Pérez Chamorro²

¹Fertisa AGIF C.L., Ecuador.

²Universidad UTE, Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias, Ecuador.

Autor de correspondencia: rodrigo.saquicela@ute.edu.ec

Recibido: 17/06/2024. Aceptado: 26/05/2025.

Publicado el 02 de julio de 2025.

Resumen

La absorción de nutrientes por el cultivo de pimienta negra (*Piper nigrum*) es fundamental para estimar su demanda nutricional y diseñar planes de fertilización eficientes. Este estudio evaluó la absorción de nutrientes en diferentes órganos de la planta al inicio de su producción (1,5 años) en un cultivo ubicado en la parroquia Valle Hermoso, Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. Se empleó el diseño completamente al azar simple, utilizando la prueba de Di Rienzo, Guzman y Casanoves para comparar medias ($\alpha = 0,05$). Los tratamientos incluyeron los órganos de la planta, los macronutrientes y los micronutrientes, con tres repeticiones por tratamiento. Los principales resultados revelaron que hojas presentaron los mayores contenidos de nitrógeno, potasio y calcio ($2,86 \pm 0,18$ a $3,14 \pm 0,26$ dag kg⁻¹), mientras que las raíces tuvieron más de boro, zinc, cobre y hierro. De igual forma, las hojas acumularon la mayor cantidad de nitrógeno, calcio y azufre ($1,00 \pm 0,32$ a $40,5 \pm 3,1$ kg ha⁻¹), así como de boro, zinc y manganeso ($32,6 \pm 3,9$ a $217,1 \pm 21,5$ g ha⁻¹). La absorción de los macronutrientes por el cultivo siguió el orden nitrógeno = potasio = calcio > magnesio > fósforo = azufre, mientras que para los micronutrientes fue hierro > manganeso > zinc > boro > cobre. Estos resultados son relevantes para diseñar planes de fertilización que optimicen la disponibilidad y absorción de nutrientes en el cultivo de pimienta negra en su etapa inicial de producción.

Palabras clave: Nutrición vegetal, cultivo, cosecha, órganos vegetales.

Abstract

Nutrient uptake by black pepper (*Piper nigrum*) is crucial for estimating its nutritional demand and designing efficient fertilization plans. This study evaluated nutrient absorption in different plant organs during the initial production stage (1,5 years) in a crop located in Valle Hermoso parish, Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. A completely randomized design was used, applying the Di Rienzo, Guzman and Casanoves test for mean comparisons ($\alpha = 0,05$). Treatments included plant organs, macronutrients, and micronutrients, with three replicates per treatment. The main results revealed that leaves had the highest contents of nitrogen, potassium, and calcium ($2,86 \pm 0,18$ to $3,14 \pm 0,26$ dag kg⁻¹), while roots accumulated higher amounts of boron, zinc, copper, and iron. Similarly, leaves absorbed the largest quantities of nitrogen, calcium, and sulfur ($1,00 \pm 0,32$ to $40,5 \pm 3,1$ kg ha⁻¹), as well as boron, zinc, and manganese ($32,6 \pm 3,9$ to $217,1 \pm 21,5$ g ha⁻¹). Macronutrient uptake followed the order nitrogen = potassium = calcium > magnesium > phosphorus = sulfur, while for micronutrients, it was iron > manganese > zinc > boron > copper. These findings are essential for designing fertilization plans that optimize nutrient availability and uptake in black pepper crops during their initial production stage.

Keywords: Plant nutrition, cultivation, harvest, plant organs.

Introducción

La producción mundial de pimienta negra (*Piper nigrum*) abarca aproximadamente 609.000 ha, con una producción total de 621.000 Mg (Resmi y Divya, 2024). Vietnam lideró en 2020 como el mayor productor, con 270.000 Mg cultivadas en 132.000 ha (Tran *et al.*, 2022). En América Latina, Brasil produce 44.610 Mg anuales, mientras que Ecuador aporta alrededor de 2.234 Mg (Hernández-Leal y Sánchez, 2021).

La absorción de nutrientes es crucial para el crecimiento y desarrollo de la pimienta negra. Issukindarsyah *et al.* (2021) reportaron que, a los 8 meses, el nitrógeno (N) y el potasio (K) se concentran principalmente en las hojas (47-51,5 % de N y 67-75,12 % de K), mientras que el fósforo (P) se distribuye de manera más uniforme entre ramas y hojas. Esta distribución refleja su papel en procesos fisiológicos clave, como la fotosíntesis (N y K) y la formación de estructuras celulares (P). Durante la cosecha, Dalazen *et al.* (2022a) encontraron que 1.000 kg de grano acumulan 19,2 kg de N; 1,21 kg de P; 3,67 kg de K; 9,85 kg de calcio (Ca); 0,73 kg de magnesio (Mg); 0,87 kg de azufre (S); 12,91 mg de hierro (Fe); 12,03 mg de zinc (Zn); 6,45 mg de cobre (Cu); 33,44 mg de manganeso (Mn) y 14,08 mg de boro (B), destacando la necesidad de una fertilización balanceada en cuanto a macro y micronutrientes para mantener la productividad. Además, resaltan que la cáscara y el pedúnculo, aunque no son comercializados, contienen nutrientes que podrían reciclarse para reducir el uso de fertilizantes externos.

Yap (2012) observó que la acumulación de Ca y Mg se mantiene estable durante el cultivo, mientras que la de N, P y K aumenta durante las etapas vegetativas y reproductivas. A los 30 meses, el cultivo absorbe 293,0 kg de N ha⁻¹; 265,0 kg de K ha⁻¹; 46,4 kg de P ha⁻¹; 35,4 kg de Mg ha⁻¹ y 74,8 kg de Ca ha⁻¹. El estudio enfatiza la importancia de una fertilización balanceada y adaptada a las necesidades fenológicas del cultivo, destacando también la relevancia de considerar tanto macronutrientes como micronutrientes para asegurar la productividad y sostenibilidad a largo plazo. Resmi y Divya (2024) identificaron genotipos prometedores para mejorar la producción de grano, pero la falta de datos sobre absorción de nutrientes limita la comprensión de los factores que influyen en el rendimiento, sugiriendo la necesidad de investigaciones que analicen la nutrición vegetal y su impacto en el rendimiento y calidad del cultivo. Swarnapriya (2020) enfatizó la importancia del manejo nutricional de N, P y K aplicado por vía foliar, el pH del suelo y el espaciamiento, aunque sin profundizar en el impacto de otros nutrientes, lo que sugiere la necesidad de investigar prácticas de manejo para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del cultivo.

A pesar de los avances, persisten vacíos en el conocimiento sobre la absorción y distribución de macro y micronutrientes en los órganos de la pimienta negra durante el inicio de la producción, una etapa crítica para el rendimiento. Estudios

previos han aportado información valiosa sobre la distribución de nutrientes en hojas y ramas, así como durante la cosecha, lo que es crucial para diseñar planes de fertilización eficientes. Sin embargo, se carece de datos específicos sobre la absorción de estos nutrientes en los órganos de la planta (raíces, tallos, ramas, hojas, inflorescencias y frutos) durante el inicio de la producción del cultivo.

Por tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la absorción y distribución de macro y micronutrientes en los diferentes órganos de la pimienta negra al inicio de su producción, con el fin de proporcionar información de referencia para la elaboración de planes de fertilización más eficientes y adaptados a las demandas del cultivo.

Materiales y métodos

Sitio del estudio

Esta investigación se llevó a cabo en un cultivo de pimienta negra de 1,5 años de edad, que se encontró establecido desde el 2016, en una finca localizada en las coordenadas 0° 5' 13,58" de latitud sur y 79° 16' 49,44" de longitud oeste, a una altitud de 307 m s.n.m. La finca se ubicaba en la parroquia Valle Hermoso, a 5,28 km por la ruta Flor del Valle, en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador.

En relación con el orden del suelo, el cultivo estuvo en un Andisol (Quezada-Crespo *et al.* 2017). Según el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2017), la región presentó una heliofanía de 753,2 h año⁻¹, una precipitación anual de 2.770,6 mm, una humedad relativa mensual del 86,0 % y una temperatura mensual de 24,1 °C. El clima se caracteriza por una estación seca que va de junio a noviembre y una estación lluviosa de diciembre a mayo.

Diseño experimental

Se consideraron tres experimentos bajo un diseño completamente al azar simple, cada uno con tres repeticiones. En el primer experimento, los tratamientos consistieron en los órganos de la planta: raíces, tallos, ramas, hojas, inflorescencias, racimos tiernos, racimos maduros (con frutos rojos), frutos y pedúnculos de los racimos maduros. En el segundo, los macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg y S; y en el tercero, los micronutrientes: Fe, Cu, B, Zn y Mn (Dalazen *et al.*, 2022a; Yap, 2012). Las repeticiones correspondieron a las plantas seleccionadas del cultivo con mayor producción de racimos, siguiendo los criterios establecidos por Cordeiro *et al.* (2025).

El cultivo se encontraba en la fase inicial de producción de racimos al momento del muestreo. Las plantas estaban dispuestas en el campo, con tutor muerto y con un espaciamiento de 2 m x 2 m, lo que equivale a una densidad de 2.500 plantas por hectárea. Alrededor de cada planta seleccionada, se tomaron 8 submuestras de suelo en un patrón zig-zag, dentro de un radio de 1 m desde el tallo y a una profundidad de 20 cm,

para formar una muestra compuesta por planta (Zu *et al.*, 2014). En cuanto al manejo del cultivo, la fertilización la realizaron en la siembra con 18,4 kg N ha⁻¹; 55,2 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 18,4 kg K₂O ha⁻¹. El control de malezas se llevó a cabo mediante chapas y herbicidas. No se realizaron podas en el cultivo.

Medición de variables

A cada muestra compuesta de suelo se le midió el pH utilizando un electrodo en una dilución suelo: agua de 1:2,5. La acidez intercambiable se extrajo con KCl 1 N y se determinó mediante volumetría. Las bases de cambio (Ca, Mg, K) y los micronutrientes (Zn, Cu, Fe, Mn) se extrajeron con Olsen Modificado a pH 8,5 y se cuantificaron por absorción atómica. La materia orgánica se determinó mediante el método de Walkley y Black, mientras que el N extraíble como amonio (NH₄⁺), el P y el B solubles se midieron por colorimetría. El S se determinó por turbidimetría, y la clase textural se evaluó mediante el método de Boyoucos (Mailappa, 2024).

Los órganos diseccionados se pesaron en fresco utilizando una balanza de precisión. Se seleccionaron muestras de cada órgano que pesaban entre 30 y 300 g, en función de su disponibilidad. Después de la pesada, los órganos se secaron a una temperatura de 65,0 °C durante 48 h para determinar el contenido de materia seca, siguiendo el método descrito por Muñoz *et al.* (2016). Para determinar el contenido de nutrientes de cada órgano, se utilizó el método de digestión húmeda con ácido nítrico y perclórico en una proporción de 2:1. La determinación de N se realizó mediante el método de Kjeldahl, mientras que el P y el B se determinaron mediante colorimetría. Los nutrientes de K, Ca, Mg, Cu, Fe y Zn se determinaron mediante absorción atómica, y el S se determinó mediante turbidimetría, siguiendo el método descrito por Pereira *et al.* (2016). El peso de la materia seca del cultivo se calculó utilizando la descripción de Cordeiro *et al.* (2025) (ver Ecuación 1).

$$MS = \sum (MH \times S/100 \times 2.500) \quad (1)$$

Donde *MS* es la cantidad de la materia seca (kg ha⁻¹) del cultivo de 1,5 años de plantado, *MH x S/100* es el peso de la materia seca de cada órgano (kg), *S* es el contenido de materia seca de cada órgano (dag kg⁻¹), *MH* es el peso de materia húmeda de cada órgano (kg) y 2.500 es el número de plantas por hectárea. La cantidad de nutrientes acumulados por el cultivo se calculó según el método descrito por Yap (2012) (ver Ecuación 2).

$$PE = \sum (MS \times E/r) \quad (2)$$

Donde *PE* es la acumulación de macronutrientes (kg ha⁻¹) o micronutrientes (g ha⁻¹) por el cultivo de 1,5 años de plantado, *E* es el contenido de macronutrientes (dag kg⁻¹) y micronutrientes (mg kg⁻¹) por órgano, *r* = 100 si *E* es macronutriente o *r* = 1.000 si *E* es micronutriente, *MS x E/r* es el peso de la acumulación de un nutriente por un órgano.

Análisis estadístico

Las variables se analizaron con el modelo lineal general y mixto en interfaz, con paquetes de R a través del programa InfoStat versión 2020 (Turiello *et al.*, 2018). Se llevó a cabo la prueba de hipótesis marginal y se compararon las medias de la producción de materia seca, contenido y acumulación de nutrientes de los órganos y planta entera, con la prueba de Di Rienzo *et al.* (2002) para su separación en rangos de significancia. El nivel de significancia utilizado fue $\alpha = 0,05$.

Resultados

Fertilidad del suelo

El análisis general de la fertilidad del suelo evidenció un pH altamente ácido, niveles de acidez que oscilan entre moderados y tóxicos, así como concentraciones bajas de N, P, K y B. Por otro lado, se registraron niveles medios de Ca, Mn, Zn, saturación de acidez, suma de bases y capacidad de intercambio catiónico efectiva, mientras que los niveles de S, Cu y Fe resultaron elevados (Tabla 1). No obstante, es importante destacar que estos diagnósticos se basan en la medición de nutrientes extraíbles, lo que no refleja necesariamente la capacidad del suelo para mantener un suministro constante de nutrientes a lo largo del tiempo. Una alternativa complementaria es el diagnóstico mediante el poder de amortiguamiento de nutrientes, el cual evalúa la capacidad del suelo para mantener la disponibilidad de nutrientes, independientemente de las adiciones o extracciones que se realicen (Nair, 2022).

Rendimiento de materia seca de cultivo

Los resultados de este estudio demostraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en el rendimiento de materia seca entre los distintos órganos de la pimienta negra (*Piper nigrum* L.). Los mayores rendimientos de materia seca se registraron en tallos y ramas, con valores medios de 1.219,1 ± 86,9 kg ha⁻¹ a 1.421,4 ± 101,3 kg ha⁻¹, respectivamente, seguidos por la producción de racimos tiernos, maduros, frutos y hojas. Por el contrario, las inflorescencias mostraron la menor producción de materia seca, lo que resalta la variabilidad en la distribución de biomasa dentro de la planta (Tabla 2). Estos resultados son similares a los de Issukindarsyah *et al.* (2021), quienes reportaron que las plantas de pimienta negra cultivadas con tutores muertos produjeron una mayor cantidad de ramas (47,44 g planta⁻¹) en comparación con las hojas (36,73 g planta⁻¹) y raíces (8,04 g planta⁻¹), un patrón también observado con tutores vivos y la aplicación de N. Estos hallazgos resaltan la variabilidad en la distribución de materia seca entre los órganos de la pimienta negra, donde tallos y ramas actúan como los principales reservorios de biomasa.

Cabe destacar que el rendimiento de materia seca en las hojas es fundamental para la producción de racimos, ya que una mayor cantidad de hojas favorece la formación de yemas, las cuales son esenciales para la reproducción y, por ende, para una mayor producción de frutos (Dombroskie *et al.*, 2016).

Tabla 1. Parámetros de la fertilidad del suelo del cultivo de la pimienta negra

Parámetro	Valor [†]	Parámetro	Valor [†]
pH	4,8 ± 0,06	Zn (mg kg ⁻¹)	2,0 ± 0,1
Materia orgánica (dag kg ⁻¹)	4,0 ± 0,1	Cu (mg kg ⁻¹)	7,4 ± 0,3
Al (cmol(+) kg ⁻¹)	0,71 ± 0,05	Fe (mg kg ⁻¹)	100,0 ± 1,2
Al + H (cmol(+) kg ⁻¹)	3,11 ± 0,08	Mn (mg kg ⁻¹)	5,2 ± 0,1
Ca (cmol(+) kg ⁻¹)	6,0 ± 0,0	B (mg kg ⁻¹)	0,36 ± 0,03
Mg (cmol(+) kg ⁻¹)	0,8 ± 0,03	Arena (dag kg ⁻¹)	46,0 ± 2,9
K (cmol(+) kg ⁻¹)	0,17 ± 0,01	Limo (dag kg ⁻¹)	48,0 ± 2,9
NH ₄ (mg kg ⁻¹)	15,0 ± 1,0	Arcilla (dag kg ⁻¹)	6,0 ± 0,0
P (mg kg ⁻¹)	2,0 ± 0,0	Clase textural	Franco arenoso
S (mg kg ⁻¹)	27,0 ± 4,0		

[†] Media ± error estándar de 3 muestras compuestas

Tabla 2. Rendimiento de materia seca del cultivo de pimienta negra (*Piper nigrum*) de 1,5 años, Santo Domingo, Ecuador

Órgano	Materia seca (kg ha ⁻¹) ^{†****}
Raíces	152,8 ± 10,9 d
Tallos	1.219,4 ± 86,9 a
Ramas	1.421,4 ± 101,3 a
Hojas	541,9 ± 38,6 c
Inflorescencias	5,0 ± 0,4 f
Racimos tiernos	850,0 ± 60,6 b
Racimos maduros	782,2 ± 55,7 b
Frutos	753,0 ± 53,7 b
Pedúnculos	29,2 ± 2,1 e
Total	4.972,6 ± 134,8

[†] Medias ± error estándar seguidas por la misma letra no presentan diferencias estadísticas (Di Rienzo *et al.* (2002) $p > 0,05$).

Contenido de nutrientes en el cultivo

Los contenidos más altos ($p \leq 0,05$) de macronutrientes se concentraron en órganos específicos de la planta. Las hojas presentaron los mayores niveles de N, K y Ca, con valores que oscilaron entre $2,86 \pm 0,18$ y $3,14 \pm 0,26$ dag kg⁻¹, mientras que las inflorescencias mostraron el mayor contenido de P. Por otro lado, el Mg se distribuyó de manera similar en raíces, tallos e inflorescencias, y el S se encontró en mayores cantidades en inflorescencias y racimos tiernos (Tabla 3). Abd-Hamid *et al.* (2023) reportaron que el contenido foliar de N en el cultivo de pimienta negra oscila entre 0,6-1,2 %, valores inferiores a los encontrados en este estudio. En cuanto al P, observaron concentraciones de 0,1-0,13 %, superiores a las registradas en la presente investigación. Por otro lado, el contenido de

K es de 1,2-2,0 %, también menor en comparación con los resultados obtenidos en este trabajo. Además, los factores como el tipo de suelo, el pH, la edad de las plantas y el manejo de la fertilización pueden influir significativamente en la absorción y distribución de nutrientes.

Boniche *et al.* (2007) reportaron que los contenidos foliares de N, P, K y S del palmito (*Bactris gasipaes*, H.B.K.) varían a lo largo del año; mientras que, los de Ca y Mg permanecen homogéneos. La pluviosidad, formación del suelo, residuos de la cosecha, ubicación de la hoja y manejo del cultivo influyen en las fluctuaciones de los contenidos nutricionales.

Tabla 3. Contenido de nutrientes del cultivo de pimienta negra (*Piper nigrum*) de 1,5 años, Santo Domingo, Ecuador

Órganos	Contenido de nutrientes en base seca					
	Macronutrientes (dag kg ⁻¹)					
	Nitrógeno ^{†***}	Fósforo ^{†***}	Potasio ^{†**}	Calcio ^{†***}	Magnesio ^{†**}	Azufre ^{†**}
Raíces	1,0 ± 0,2 c	0,03 ± 0,004 c	2,17 ± 0,12 b	1,99 ± 0,12 b	0,25 ± 0,01 a	0,02 ± 0,01 b
Tallos	1,6 ± 0,1 c	0,02 ± 0,004 c	1,85 ± 0,12 b	1,53 ± 0,1 c	0,22 ± 0,01 a	0,02 ± 0,01 b
Ramas	1,6 ± 0,2 c	0,03 ± 0,004 c	1,96 ± 0,12 b	1,58 ± 0,1 c	0,18 ± 0,01 b	0,02 ± 0,01 b
Hojas	2,8 ± 0,2 a	0,04 ± 0,01 b	3,14 ± 0,26 a	2,86 ± 0,18 a	0,17 ± 0,01 b	0,07 ± 0,02 a
Inflorescencias	1,7 ± 0,2 c	0,17 ± 0,03 a	1,81 ± 0,12 b	1,26 ± 0,08 d	0,25 ± 0,01 a	0,06 ± 0,02 a
Racimos tiernos	2,0 ± 0,1 b	0,08 ± 0,01 b	1,78 ± 0,12 b	0,97 ± 0,06 e	0,20 ± 0,01 b	0,10 ± 0,03 a
Racimos maduros	1,6 ± 0,2 c	0,05 ± 0,01 b	1,68 ± 0,12 b	0,92 ± 0,06 e	0,19 ± 0,01 b	0,03 ± 0,01 b
Frutos	1,6 ± 0,2 c	0,05 ± 0,01 b	1,39 ± 0,26 b	0,91 ± 0,06 e	0,19 ± 0,01 b	0,03 ± 0,01 b
Pedúnculos	1,2 ± 0,2 c	0,02 ± 0,004 c	1,80 ± 0,12 b	1,15 ± 0,07 d	0,19 ± 0,01 b	0,03 ± 0,01 b
Total^{†***}	2,0 ± 0,06 A	0,04 ± 0,01 C	1,86 ± 0,06 A	1,74 ± 0,04 A	0,19 ± 0,01 B	0,05 ± 0,01 C
	Micronutrientes (mg kg ⁻¹)					
	Boro ^{†***}	Zinc ^{†***}	Cobre ^{†***}	Hierro ^{†**}	Manganeso ^{†***}	
Raíces	28 ± 3,5 a	27,6 ± 0,4 a	26,7 ± 2,0 a	315,0 ± 57,0 a	29,7 ± 1,8 d	
Tallos	9,3 ± 1,7 c	17,7 ± 2,0 c	24,0 ± 1,8 a	191,7 ± 35,0 b	31,3 ± 1,8 d	
Ramas	17,0 ± 2,1 b	25,0 ± 0,3 b	16,0 ± 1,2 b	116,7 ± 22,0 b	152,3 ± 9,0 a	
Hojas	23 ± 2,9 a	30,3 ± 1,7 a	11,3 ± 0,8 b	159,0 ± 29,0 b	30,0 ± 1,8 d	
Inflorescencias	7,7 ± 1,0 c	31,7 ± 1,7 a	23,0 ± 1,7 a	135,7 ± 25,0 b	48,3 ± 2,8 b	
Racimos tiernos	26,0 ± 3,2 a	17,7 ± 0,3 c	14,3 ± 1,1 b	198,0 ± 36,0 b	36,7 ± 2,2 c	
Racimos maduros	15,3 ± 1,9 b	15,4 ± 0,3 d	13,7 ± 1,0 b	136,0 ± 25,0 b	27,7 ± 1,6 d	
Frutos	14,7 ± 1,8 b	15,0 ± 0,3 d	13,7 ± 1,0 b	133,7 ± 25,0 b	27,7 ± 1,6 d	
Pedúnculos	28,7 ± 3,6 a	24,7 ± 0,3 b	12,0 ± 0,9 b	192,6 ± 4,0 b	25,3 ± 1,5 d	
Total^{†***}	19,4 ± 1,5 C	23,0 ± 0,5 C	15,2 ± 0,5 D	161,1 ± 16,3 A	66,0 ± 1,5 B	

† Medias ± error estándar seguidas por la misma letra no presentan diferencias estadísticas (Di Rienzo *et al.*, (2002) $p > 0,05$). Las minúsculas se leen por columnas; las mayúsculas, para la fila del total.

Los resultados obtenidos evidencian una distribución diferencial del contenido de macronutrientes en los distintos órganos de la planta, lo que sugiere una especialización funcional en la acumulación y utilización de estos elementos. Según De Mello (2021), los macronutrientes se redistribuyen desde las hojas a los sumideros, como las hojas nuevas y los frutos, ya sea en forma de compuestos orgánicos o como elemento, que finalmente participan en la formación de materia seca de la planta. Las hojas tuvieron los mayores contenidos de N, K, Ca, S; las inflorescencias, los mayores contenidos de P, Mg y S. Los contenidos se ajustan a las funciones de los órganos en la planta, ya sea como fuente o sumidero.

Estos resultados resaltan la complejidad de la dinámica nutricional en las plantas y la necesidad de abordar estudios más detallados que exploren las interacciones entre los nutrientes y su impacto en el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos. Además, estos hallazgos podrían servir como base para el diseño de estrategias de manejo agronómico más eficientes, orientadas a maximizar la absorción y utilización de nutrientes en los órganos clave de la planta.

Por otro lado, la planta en su conjunto mostró los mayores contenidos de N, K y Ca, con valores que oscilaron entre $1,74 \pm 0,04$ y $2,0 \pm 0,06$ dag kg⁻¹. En cuanto a la distribución de macronutrientes, se observó el siguiente orden: N = K = Ca > Mg > P = S (Tabla 3). Según De Mello (2021), los contenidos típicos de macronutrientes en las plantas son del 2,0 % de N; 2,5 % de K y 1,3 % de Ca, que son similares a los observados, excepto para el K que tuvo menor contenido. Además, la alta concentración de N, K y Ca en la planta sugiere que estos nutrientes son esenciales para el crecimiento vegetativo y reproductivo, mientras que la menor concentración de Mg, P y S refleja su papel más específico en procesos fisiológicos. Esta diferencia podría deberse a factores específicos del cultivo de pimienta negra, como la fertilidad del suelo (Tabla 1), el manejo de la fertilización o las características genéticas de la planta. Futuras investigaciones podrían enfocarse en evaluar el impacto de diferentes prácticas de fertilización y manejo del suelo en la absorción y distribución de nutrientes, especialmente en condiciones de suelos ácidos o con limitaciones de fertilidad.

En cuanto a los micronutrientes, las raíces mostraron un mayor ($p \leq 0,05$) contenido de B, Zn, Cu y Fe, mientras que las hojas y las inflorescencias destacaron por su alto contenido de Zn ($26,7 \pm 2,0$ a $315,0 \pm 57,0$ mg kg⁻¹). Las ramas fueron el tejido con el mayor contenido de Mn (Tabla 3). Estos resultados sugieren que la distribución de micronutrientes varía significativamente entre los diferentes tejidos de la planta, lo que podría estar relacionado con sus funciones fisiológicas específicas, como ser componentes integrales de enzimas esenciales del metabolismo vegetal (De Mello, 2021). En cuanto a la distribución de micronutrientes en los órganos de la planta, las raíces mostraron el mayor contenido de la mayoría de estos elementos, lo que concuerda con los hallazgos de Magalhães *et al.* (2023) en pimienta dulce

(*Capsicum chinense* Jacquin), quienes destacaron que las raíces son el principal órgano de absorción y almacenamiento de nutrientes. Este patrón podría estar relacionado con la función de las raíces como la primera barrera de absorción de nutrientes desde el suelo, así como con su papel en la regulación del transporte de estos elementos hacia otras partes de la planta.

Dalazen *et al.* (2022b) observaron que los contenidos de Zn (25,0-35,0 mg kg⁻¹) y Cu (5,0-25,0 mg kg⁻¹) en las hojas de pimienta negra fueron similares a los observados en la presente investigación; mientras que, los del B (30,0-50,0 mg kg⁻¹), Mn (90,0-170,0 mg kg⁻¹) y Fe (10,0-120,0 mg kg⁻¹) no coincidieron. Además, en dos ciclos seguidos de cosecha el contenido de micronutrientes cambia de aproximadamente de 22,0 a 35,0 mg Zn kg⁻¹; de 42,0 a 36,0 mg B kg⁻¹ y de 85,0 a 76,0 mg Fe kg⁻¹. El Cu y Mn se mantuvieron estables en 10,0 y 160,0 mg kg⁻¹, respectivamente. Asimismo, el contenido de micronutrientes de los racimos maduros fue similar para el Zn y no coincidieron para el del Fe, Cu, Mn y B; que también varían entre ciclos. La variación del contenido de nutrientes se debería a cambios de la bioquímica vegetal, causados entre otros, por el suelo, clima y manejo del cultivo.

Estos hallazgos refuerzan la idea de que la absorción de nutrientes está influenciada por una interacción dinámica entre la fisiología de la planta y las condiciones ambientales. Por lo tanto, es fundamental considerar estos factores al evaluar el contenido nutricional de los cultivos y al diseñar estrategias de manejo agronómico que optimicen la absorción y utilización de micronutrientes.

El contenido total de Fe fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en la planta entera, con un valor de $161,1 \pm 16,3$ mg Fe kg⁻¹, lo que destaca la importancia de este micronutriente en el metabolismo vegetal. El orden del contenido de micronutrientes en la planta fue Fe > Mn > B = Zn > Cu (Tabla 3), que coincidió en su mayoría con el orden publicado por De Mello (2021) para las plantas en general, excepto que el B y el Zn fueron iguales en la presente investigación. Esta discrepancia podría atribuirse a las condiciones específicas del cultivo, como el manejo, el clima, el suelo, pueden influir en la absorción y distribución de estos elementos en la planta (Boniche *et al.*, 2007).

El micronutriente con mayor contenido en la planta fueron el Fe seguido del Mn; el de menor contenido, el Cu. Las raíces fueron el órgano con mayor contenido de la mayoría de los micronutrientes. Es importante analizar el contenido de los micronutrientes de los órganos de la planta en varias condiciones de suelo, clima y manejo para estimar con más precisión su variabilidad.

Acumulación de nutrientes por el cultivo

Las hojas presentaron la mayor ($p \leq 0,05$) acumulación de N, Ca y S, entre $1,00 \pm 0,32$ y $40,5 \pm 3,1$ kg ha⁻¹, seguido de las ramas, que mostraron los niveles más altos de K y Mg. Por otro lado, las raíces registraron los menores contenidos de N,

P, K, Ca, Mg y S (Tabla 4). Estos resultados coinciden con los hallazgos de Issukindarsyah *et al.* (2021), quienes señalaron que las hojas de pimienta negra acumulan más N ($0,916 \text{ g planta}^{-1}$) y P ($0,15 \text{ g planta}^{-1}$) que las ramas, seguido por las raíces. Sin embargo, el K ($1,414 \text{ g planta}^{-1}$) es más acumulado por las ramas.

Las hojas y las ramas fueron los órganos con mayor acumulación de macronutrientes, lo que sugiere que estos tejidos desempeñan un papel crucial en el almacenamiento y redistribución de nutrientes durante el crecimiento y desarrollo de la planta. Por el contrario, las raíces, inflorescencias y pedúnculos mostraron las menores acumulaciones, lo que podría estar relacionado con su función primaria en la absorción de nutrientes y el soporte estructural, respectivamente. Este patrón de distribución de nutrientes es consistente con lo observado por Zhang *et al.* (2019) en pimiento (*Capsicum annuum* L.), donde las hojas y los frutos acumularon las mayores cantidades de nutrientes, mientras que las raíces, aunque esenciales para la absorción de nutrientes, presentaron una menor acumulación, lo que refuerza la idea de que los órganos aéreos son clave en el almacenamiento y redistribución de nutrientes durante el desarrollo de la planta.

Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar la distribución de macronutrientes en los diferentes órganos de la planta para optimizar las prácticas de fertilización y mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes. Esta idea está de acuerdo con lo propuesto por Cordeiro *et al.* (2025), quienes destacan que comprender la dinámica de la acumulación de nutrientes por parte del cultivo es fundamental para diseñar planes de fertilización efectivos.

En este contexto, es clave aplicar la fuente correcta de nutrientes, en la dosis, el momento y el lugar adecuados, principios conocidos como las 4R de la nutrición vegetal (*Right Source, Right Rate, Right Time, Right Place*) (Flis, 2019).

Las hojas fueron el órgano que acumuló más cantidad de la mayoría de macronutrientes, seguido de las ramas. Es importante que en futuras investigaciones se evalúe por edades la cantidad acumulada de macronutrientes, para estimar su traslocación y reciclaje entre órganos de la planta, con el fin de conocer su dinámica nutricional.

El cultivo de pimienta negra acumuló una cantidad significativamente mayor ($p \leq 0,05$) de N, K y Ca, con valores que oscilaron entre $86,4 \pm 4,0$ y $97,9 \pm 0,95 \text{ kg ha}^{-1}$. El orden de acumulación de los nutrientes fue el siguiente: $N = K = Ca > Mg > P = S$ (Tabla 4). Este comportamiento es consistente con lo reportado por Paduit *et al.* (2018), quienes también observaron que la pimienta negra acumula principalmente más cantidad de N que de K, seguido de Ca, Mg y P. Sin embargo, las cantidades de N y K acumuladas son mayores (160 kg ha^{-1} de N y 125 kg ha^{-1} de K) en comparación con los valores observados en esta investigación, sin embargo, se acumula más llegando a su máximo a los 26 meses de edad.

Las diferencias en las cantidades de nutrientes acumulados pueden atribuirse a varios factores, como las condiciones del suelo, el manejo del cultivo, la variedad de pimienta negra utilizada y las prácticas de fertilización. En el estudio de Paduit *et al.* (2018), es posible que las condiciones del suelo y el manejo del cultivo hayan favorecido una mayor disponibilidad de nutrientes, lo que resultó en una mayor acumulación de N y K. Los resultados de este estudio subrayan la importancia de un manejo nutricional adecuado en el cultivo de pimienta negra. Dado que la acumulación de N, K y Ca es significativamente mayor, es esencial la aplicación de estos nutrientes en cantidades adecuadas y en los momentos críticos del ciclo de cultivo, especialmente durante la etapa de desarrollo del fruto. Además, la aplicación de fertilizantes debe considerar la distribución de nutrientes en la planta para asegurar que los nutrientes estén disponibles cuando más se necesitan (Cordeiro *et al.*, 2025).

En cuanto a la cosecha, los frutos y racimos maduros acumularon cantidades de macronutrientes con diferencias no significativas ($p > 0,05$) entre sí, pero significativamente mayores ($p \leq 0,05$) que los pedúnculos de los racimos maduros (Tabla 4). Este hallazgo coincide con lo reportado por Dalazen *et al.* (2022a), quienes también observaron que los frutos maduros acumulan una mayor cantidad de macronutrientes en comparación con los pedúnculos. La cosecha de $782,2 \pm 55,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de materia seca de racimos maduros acumuló principalmente N y K ($11,9 \pm 1,3$ a $14,4 \pm 1,0 \text{ kg}$), en cantidades significativamente mayores que las de P, Ca, Mg y S (Tabla 4). Este comportamiento es consistente con lo reportado por Dalazen *et al.* (2022a), donde la cosecha también acumuló cantidades similares de N ($12,93 \text{ kg}$) y Ca ($7,48 \text{ kg}$). Sin embargo, no se observaron coincidencias en las acumulaciones de P ($0,86 \text{ kg}$) y S ($0,62 \text{ kg}$), que fueron mayores, ni en las de K ($5,91 \text{ kg}$) y Mg ($0,79 \text{ kg}$), que fueron menores. Estas diferencias pueden atribuirse a variaciones en las condiciones del suelo, como la acidez, la cual puede limitar la disponibilidad de nutrientes esenciales como P, K, Ca y Mg, afectando así la absorción de nutrientes por parte de la planta. Asimismo, factores como la edad del cultivo, las prácticas de preparación del suelo y los métodos de fertilización también influyen, tal como lo observaron Abd-Hamid *et al.* (2023) en el cultivo de pimienta negra en diversas regiones.

En un plan de fertilización, es fundamental considerar la reposición de los nutrientes extraídos por la cosecha, ajustando las aplicaciones según la fertilidad del suelo (Wendling *et al.*, 2008). Parte de los macronutrientes puede reponerse a través de los pedúnculos, los cuales aportarían principalmente $0,9 \pm 0,1 \text{ kg}$ de K; $0,36 \pm 0,04 \text{ kg}$ de N y $0,33 \pm 0,03 \text{ kg}$ de Ca por cada $29,2 \pm 2,1 \text{ kg}$ de materia seca proveniente de la cosecha de 1 ha (Tabla 2 y 4). Este aporte de nutrientes desde los pedúnculos puede ser una fuente adicional para mantener la fertilidad del suelo, aunque no es suficiente para cubrir la demanda total del cultivo.

Tabla 4. Nutrientes acumulados por el cultivo de pimienta negra (*Piper nigrum*) de 1,5 años, Santo Domingo, Ecuador

Órgano	Acumulación de nutrientes en base seca					
	Macronutrientes (kg ha ⁻¹)					
	Nitrógeno ^{†***}	Fósforo ^{†***}	Potasio ^{†***}	Calcio ^{†***}	Magnesio ^{†***}	Azufre ^{†***}
Raíces	1,5 ± 0,2 d	0,04 ± 0,01 c	2,1 ± 0,23 d	3,0 ± 0,2 d	0,38 ± 0,03 c	0,03 ± 0,01 c
Tallos	8,6 ± 0,9 c	0,13 ± 0,02 b	9,0 ± 0,7 c	8,2 ± 0,6 c	1,2 ± 0,1 b	0,09 ± 0,03 b
Ramas	19,2 ± 2,1 b	0,33 ± 0,06 a	26,4 ± 1,7 a	19,2 ± 1,5 b	2,2 ± 0,2 a	0,20 ± 0,06 b
Hojas	39,9 ± 4,3 a	0,62 ± 0,11 a	25,3 ± 1,6 a	40,5 ± 3,1 a	2,4 ± 0,2 a	1,00 ± 0,32 a
Inflorescencias	0,09 ± 0,01 f	0,01 ± 0,002 d	0,1 ± 0,02 f	0,06 ± 0,005 f	0,01 ± 0,001 e	0,0029 ± 0,0009 e
Racimos tiernos	16,7 ± 1,8 b	0,64 ± 0,12 a	15,3 ± 1,1 b	8,2 ± 0,6 c	1,7 ± 0,2 b	0,82 ± 0,26 a
Racimos maduros	11,9 ± 1,3 c	0,42 ± 0,08 a	14,4 ± 1,0 b	7,2 ± 0,6 c	1,5 ± 0,1 b	0,24 ± 0,08 b
Frutos	11,5 ± 1,2 c	0,41 ± 0,07 a	13,5 ± 1,0 b	6,8 ± 0,5 c	1,4 ± 0,1 b	0,23 ± 0,07 b
Pedúnculos	0,36 ± 0,04 e	0,01 ± 0,001 d	0,9 ± 0,1 e	0,33 ± 0,03 e	0,05 ± 0,005 d	0,01 ± 0,003 d
Total ^{†***}	97,9 ± 0,95 A	2,2 ± 0,95 C	92,6 ± 4,02 A	86,4 ± 4,0 A	9,4 ± 0,3 B	2,4 ± 0,95 C
	Micronutrientes (g ha ⁻¹)					
	Boro ^{†***}	Zinc ^{†***}	Cobre ^{†***}	Hierro ^{†***}	Manganeso ^{†***}	
Raíces	4,3 ± 0,5 d	4,3 ± 0,4 e	4,1 ± 0,6 d	48,7 ± 11,9 b	4,6 ± 0,5 d	
Tallos	5,1 ± 0,6 d	9,6 ± 0,8 d	12,9 ± 1,1 c	100,7 ± 24,7 a	16,3 ± 1,6 c	
Ramas	20,5 ± 2,4 b	30,4 ± 2,3 b	19,4 ± 0,7 a	143,5 ± 35,1 a	38,2 ± 3,8 b	
Hojas	32,6 ± 3,9 a	43,2 ± 3,2 a	16,1 ± 1,0 b	226,6 ± 55,5 a	217,1 ± 21,5 a	
Inflorescencias	0,04 ± 0,004 f	0,16 ± 0,02 g	0,11 ± 0,01 f	0,67 ± 0,16 d	0,24 ± 0,02 f	
Racimos tiernos	21,9 ± 2,6 b	15,0 ± 1,2 c	12,2 ± 0,5 c	175,5 ± 43,0 a	31,0 ± 3,1 b	
Racimos maduros	11,8 ± 1,4 c	12,0 ± 1,0 d	10,7 ± 1,2 c	105,4 ± 25,8 a	21,4 ± 2,1 c	
Frutos	11,0 ± 1,31 c	11,3 ± 0,9 d	10,3 ± 1,2 c	99,7 ± 24,4 a	20,6 ± 2,0 c	
Pedúnculos	0,82 ± 0,1 e	0,72 ± 0,08 f	0,35 ± 0,02 e	5,7 ± 1,4 c	0,74 ± 0,07 e	
Total ^{†***}	96,3 ± 4,5 D	114,7 ± 5,6 C	75,5 ± 3,2 E	801,0 ± 74,2 A	328,8 ± 22,8 B	

† Medias ± error estándar de los seguidas por la misma letra no presentan diferencias estadísticas (Di Rienzo *et al.* (2002) $p > 0,05$). Las minúsculas se leen por columnas; las mayúsculas, para la fila del total.

Además, es importante investigar la acumulación de nutrientes por la pulpa del grano cosechado. Según Dalazen *et al.* (2022a), la pulpa acumula una mayor cantidad de K en comparación con los granos descascarados. Esto sugiere que, al considerar la reposición de nutrientes, no solo se debe tener en cuenta la extracción por los frutos y racimos, sino también la contribución de otros componentes de la planta, como los pedúnculos y la pulpa. Este enfoque integral permitiría diseñar planes de fertilización más precisos y eficientes, asegurando que los nutrientes sean repuestos de manera adecuada para mantener la productividad del cultivo y la fertilidad del suelo.

Los siguientes órganos presentaron una acumulación significativamente mayor de micronutrientes ($p \leq 0,05$): las hojas mostraron las mayores cantidades de B, Zn y Mn, con valores que oscilaron entre $32,6 \text{ g ha}^{-1} \pm 3,9 \text{ g ha}^{-1}$ y $217,1 \text{ g ha}^{-1} \pm 21,5 \text{ g ha}^{-1}$; las ramas acumularon $19,4 \text{ g ha}^{-1} \pm 0,7 \text{ g ha}^{-1}$ de Cu; mientras que los tallos, ramas, hojas, frutos, racimos tiernos y maduros registraron acumulaciones de Fe entre $99,7 \text{ g ha}^{-1} \pm 24,4 \text{ g ha}^{-1}$ y $226,6 \text{ g ha}^{-1} \pm 55,5 \text{ g ha}^{-1}$ (Tabla 4). Según Tucuch-Haas *et al.* (2019), en plantas de ají (*Capsicum chinense*), las raíces son los órganos que acumulan la mayor cantidad de micronutrientes, con valores de 200,0 mg de Fe por planta y entre 0,5 y 3,0 mg por planta de Cu, Zn y Mn; mientras que las raíces, tallos y hojas acumulan las mayores cantidades de B, con valores entre 1,0 y 1,2 mg por planta. Sin embargo, este patrón no coincide con lo observado en el cultivo de pimienta negra.

El Fe es el micronutriente acumulado en mayor cantidad por los cultivos. Este elemento desempeña un papel fundamental en la formación de cloroplastos, participa en la síntesis de proteínas y es esencial para la formación de sistemas respiratorios enzimáticos (De Mello, 2021). Estos hallazgos resaltan la importancia del Fe en el metabolismo vegetal y su influencia en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

El cultivo de pimienta negra acumuló micronutrientes en el siguiente orden, con diferencias significativas ($p \leq 0,05$): $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{B} > \text{Cu}$. El Fe y el Mn fueron los micronutrientes acumulados en mayor cantidad, con valores que oscilaron entre $328,8 \pm 22,8 \text{ g ha}^{-1}$ y $801,0 \pm 74,2 \text{ g ha}^{-1}$, respectivamente (Tabla 4). Según Bortolon *et al.* (2018), el cultivo de soja (*Glycine max* L. Merr.) también acumula los micronutrientes en el mismo orden que el observado en la pimienta negra, con el Fe (1.260 g ha^{-1}) y el Mn (200 g ha^{-1}) como los más acumulados. Sin embargo, la soja presenta una mayor acumulación de estos nutrientes en comparación con los de la pimienta negra, lo que podría estar relacionado con las diferencias en la fisiología de ambos cultivos y en las condiciones de crecimiento. Li *et al.* (2015) observaron que en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), el aumento de los niveles de K en el suelo afecta la acumulación de micronutrientes, particularmente reduciendo la cantidad de Mn y Fe en las plantas. Aunque el estudio de Li *et al.* (2015) se centró en el cacao, los mecanismos de absorción y las

interacciones entre nutrientes pueden extrapolarse a otros cultivos, como la pimienta negra.

La alta acumulación de Fe y Mn por el cultivo de la pimienta negra sugiere que estos nutrientes deben ser manejados cuidadosamente en los programas de fertilización. Aunque la acumulación de Zn, B y Cu es menor, su papel en el crecimiento y desarrollo de la planta no debe subestimarse. Es importante evaluar no solo el contenido de estos micronutrientes en el cultivo, sino también otros como el Ni, Mo y Cl (De Mello, 2021). Además, sería interesante explorar cómo los niveles de K y otros macronutrientes afectan la absorción de micronutrientes en la pimienta negra, similar a lo observado en el cacao.

En cuanto a la acumulación de micronutrientes por la cosecha, los racimos maduros y los frutos acumularon significativamente ($p \leq 0,05$) más que los pedúnculos de los racimos. La cosecha de $782,2 \pm 55,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de materia seca de racimos maduros mostró una mayor acumulación de Fe y Mn, con valores que oscilaron entre $21,4 \pm 2,1 \text{ g ha}^{-1}$ y $105,4 \pm 25,8 \text{ g ha}^{-1}$, respectivamente. Estos valores fueron significativamente mayores en comparación con la absorción de B, Zn y Cu, que presentaron una acumulación menor (Tabla 4). La cantidad de Mn acumulado por la cosecha coincidió con lo reportado por Dalazen *et al.* (2022a), que es de $19,5 \text{ g Mn ha}^{-1}$. Sin embargo, para los otros micronutrientes (Fe, Zn, Cu y B), no se observó una coincidencia, los cuales se encuentran en un rango de 4,49 a $19,48 \text{ g ha}^{-1}$. Estas diferencias podrían explicarse por la variabilidad en la acumulación de micronutrientes durante los diferentes estados de maduración, como señalaron Dalazen *et al.* (2022b), quienes observaron que el contenido de micronutrientes en los racimos disminuye a medida que los frutos maduran, debido al efecto de dilución causado por el aumento en la acumulación de materia seca.

Se ha estimado la acumulación de micronutrientes por la cosecha, los racimos maduros y los pedúnculos, lo cual es de utilidad para planificar su reposición y reciclaje, especialmente en el caso de los pedúnculos. Estos hallazgos sugieren que los racimos maduros y los frutos son los principales órganos de acumulación de micronutrientes, especialmente de Mn, lo que resalta su relevancia en la producción de los frutos de pimienta negra. Sin embargo, dada la variabilidad observada al comparar con otros estudios, es fundamental realizar muestreos en diversas zonas de cultivo en futuras investigaciones para estimar con mayor precisión las cantidades absorbidas de micronutrientes, así como de macronutrientes y la producción de materia seca.

Conclusiones

Los nutrientes absorbidos por los principales órganos (raíces, tallos, ramas, hojas, inflorescencias y racimos) de la planta de pimienta negra (*Piper nigrum*) al inicio de su producción muestran diferencias, así como variaciones en el orden de absorción de los nutrientes. Se revela que las hojas acumulan

las mayores cantidades de macronutrientes y también tienen los mayores contenidos de los mismos. El contenido y la acumulación de macronutrientes absorbidos por el cultivo siguen este orden: nitrógeno = potasio = calcio > magnesio > fósforo = azufre. La acumulación de macronutrientes por 1 ha de cultivo es de 97,9 kg $\pm$ 1,0 kg de nitrógeno; 92,6 kg $\pm$ 4,0 kg de potasio; 86,4 kg $\pm$ 4,0 kg de calcio; 9,4 kg $\pm$ 0,3 kg de magnesio; 2,4 kg $\pm$ 1,0 kg de fósforo y 2,4 kg $\pm$ 1,0 kg de azufre. Queda en evidencia que las cantidades de nitrógeno, potasio y calcio acumuladas por el cultivo son las más demandadas entre los macronutrientes.

Los hallazgos muestran que las raíces tienen los mayores contenidos de micronutrientes, mientras que las hojas acumulan las mayores cantidades de los mismos. El orden del contenido de micronutrientes totales en la planta es el siguiente: hierro > manganeso > zinc = boro > cobre, similar al orden de su acumulación. En 1 ha de cultivo se acumulan 801,0 g $\pm$ 74,2 g de hierro; 328,8 g $\pm$ 22,8 g de manganeso; 114,7 g $\pm$ 5,6 g de zinc; 96,3 g $\pm$ 4,5 g de boro y 75,5 g $\pm$ 3,2 g de cobre. Las cantidades acumuladas de los nutrientes por el cultivo sugieren la demanda para la elaboración de planes de fertilización.

Los resultados evidencian que la cosecha de los racimos maduros acumula las siguientes cantidades de nutrientes en 1 ha de cultivo: 11,9 kg $\pm$ 1,3 kg de nitrógeno; 0,42 kg $\pm$ 0,08 kg de fósforo; 14,4 kg $\pm$ 1,0 kg de potasio; 7,2 kg $\pm$ 0,6 kg de calcio; 1,5 kg $\pm$ 0,1 kg de magnesio; 0,24 kg $\pm$ 0,08 kg de azufre; 11,8 g $\pm$ 1,4 g de boro; 12,0 g $\pm$ 1,0 g de zinc; 10,7 g $\pm$ 1,2 g de cobre; 105,4 g $\pm$ 25,8 g de hierro y 21,4 g $\pm$ 2,1 g de manganeso. La acumulación de nutrientes por los racimos maduros propone las cantidades de nutrientes a reponer en el cultivo.

Referencias bibliográficas

- Abd-Hamid, I., Wan-Yahaya, W. y Idris, W. (2023). Effect of different black pepper crop ages on the availability of nitrogen, phosphorus, and potassium. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 45(1), 1-10. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v45i1.2618>
- Boniche, J., Alvarado, A., Molina, E. y Smyth, T. (2007). Variación estacional de nutrimentos en hojas de pejibaye para palmito en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 55-72. <https://doi.org/10.15517/rac.v32i1.6770>
- Bortolon, L., Oliveira, E. S., De Camargo, F. P., Seraglio, N. A., Lima, A. O., Rocha, P. H., De Souza, J. P., Sousa, W. C., Tomazzi, M., Lago, B. C., Nicolodi, M. y Gianello, C. (2018). Yield and nutrient uptake of soybean cultivars under intensive cropping systems. *Journal of Agricultural Science*, 10(12), 344-357. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n12p344>
- Cordeiro, C. F., Galdi, L. V. y Echer, F. R. (2025). Nutrient uptake and removal by runner peanut cultivars of different maturity groups. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 49, 1-18. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240088>
- Dalazen, J., Pereira, G., Duarte, H., Cochicho, J., Lacerda, V., Romão, W. y Luiz, F. (2022a). Nutrient accumulation in fruits and grains of black pepper at different ripening stages. *Ciência Rural*, 52(9), 1-9. <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210470>
- Dalazen, J., Pereira, G., Gontijo, I., Machado, J. y Partelli, F. (2022b). Micronutrient content and accumulation in leaves and bunches of black pepper during two crop cycles. *Revista Ceres*, 65(5), 594-602. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269050013>
- De Mello, R. (2021). *Mineral nutrition of tropical plants*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>
- Di Rienzo, J. A., Guzman, A. W. y Casanoves, F. (2002). A multiple-comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 7, 129-142. <https://doi.org/10.1198/10857110260141193>
- Dombroskie, S. L., Tracey, A. J. y Aarssen, L. W. (2016). Leafing intensity and the fruit size/number trade-off in woody angiosperms. *Journal of Ecology*, 104(6), 1759-1767. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12622>
- Flis, S. (2019). Calcium: Improved plant health and nutrition through 4R management. *Crops & Soils*, 52(4), 28-30. <https://doi.org/10.2134/cs2019.52.0401>
- Hernández-Leal, O. F. y Sánchez, F. (2021). Black pepper's essential oils affect the foraging behavior of Seba's fruit-eating bat. *International Journal of Pest Management*, 69(4), 299-305. <https://doi.org/10.1080/09670874.2021.1918355>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2017). *Anuario meteorológico No. 53-2013*. <https://drive.google.com/file/d/1mroZYqKlyNjouAj0nlGD75AO9vDkhNYS/view>
- Issukindarsyah, I., Sulistyaningsih, E., Indradewa, D. y Putra, E.T.S. (2021). The effect of ammonium nitrate ratio and support types on the NPK uptake and growth of black pepper (*Piper nigrum* L.) in field conditions. *Poljoprivreda*, 27(2), 25-33. <https://doi.org/10.18047/poljo.27.2.3>
- Li, Y.-M., Elson, M., Zhang, D., He, Z., Sicher, R. C. y Baligar, V. (2015). Macro and micro nutrient uptake parameters and use efficiency in cacao genotypes as influenced by levels of soil applied K. *International Journal of Plant & Soil Science*, 7(2), 80-90. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2015/17368>
- Magalhães, D. D., Viégas, I. D., Barata, H. D., Costa, M. G., Silva, B. C. y Mera, W. Y. (2023). Deficiencies of nitrogen, calcium, and micronutrients are the most limiting factors for growth and yield of small pepper plants. *Revista Ceres*, 70(3), 125-135. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202370030013>
- Mailappa, A. S. (2024). *Experimental soil biology*

- and fertility (1ra ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003430100>
- Muñoz, J., Huerta, M., Lara, A., Rangel, R. y De la Rosa, J. (2016). Producción de materia seca de forrajes en condiciones de Trópico Húmedo en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16, 3329-3341. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i16.400>
- Nair, K. P. (2022). Precise quantification of plant nutrient bioavailability: The relevance of the nutrient buffer power concept. *Advances in Agronomy* (174), 189-233. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.03.003>
- Paduit, N., Pampolino, P., Aye, T. M. y Oberthür, T. (2018). Nutrient uptake and distribution in black pepper. *Better Crops*, 102(4), 24-27. https://www.researchgate.net/publication/328745662_Nutrient_Uptake_and_Distribution_in_Black_Pepper
- Pereira, M. L., Aquino, L., Ferreira, R., Clemente, J., De Aquino, P. y Oliveira, T. (2016). Diagnosis of the nutritional status of garlic crops. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40, 1-14. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20140771>
- Quezada-Crespo, C. J., Carrillo-Zenteno, M. D., Morales-Intriago, F. L., y Carrillo-Alvarado, R. A. (2017). Nutrient critical levels and availability in soils cultivated with peach palm (*Bactris gasipaes* Kunth.) in Santo Domingo de Los Tsáchilas, Ecuador. *Acta Agronómica*, 66(2), 235-240. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/55026
- Resmi, P. y Divya, K. K. (2024). Variability analysis in genotypes of black pepper (*Piper nigrum* L.) for yield and yield related traits. *Plant Science Today*, 11(sp3), 25-29. https://www.researchgate.net/publication/387415704_Variability_analysis_in_genotypes_of_black_pepper_Piper_nigrum_L_for_yield_and_yield_related_traits
- Swarnapriya, R. (2020). Effect of spacing and application of foliar nutrients on growth and yield of black pepper (*Piper nigrum*). *Journal of Dry Zone Agriculture*, 6(1), 52-62. <http://repo.lib.jfn.ac.lk/xmlui/handle/123456789/3096>
- Tran, D. M., Nguyen, T. H., Huynh, T. U., Do, T. O., Nguyen, Q.-V. y Nguyen, A. D. (2022). Analysis of endophytic microbiome dataset from roots of black pepper (*Piper nigrum* L.) cultivated in the Central Highlands region, Vietnam using 16S rRNA gene metagenomic next-generation sequencing. *Data in Brief*, 42, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108108>
- Tucuch-Haas, C., Pérez-Balam, J., Dzib-Ek, M., Alcántar-González, G. y Larqué-Saavedra, A. (2019). El ácido salicílico aumenta la acumulación de macro y micronutrientes en chile habanero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4), 839-847. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1694>
- Turiello, P., Larriestra, A., Bargo, F., Relling, A. y Weiss, W. (2018). Sources of variation in corn silage and total mixed rations of commercial dairy farms. *The Professional Animal Scientist*, 34(2), 148-155. <https://doi.org/10.15232/pas.2017-01704>
- Wendling, A., Foletto, F. L., Cubilla, M. M., Carneiro, T. J. y Mielniczuk, J. (2008). Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(5), 1929-1939. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500014>
- Yap, C. A. (2012). Determination of nutrient uptake characteristic of black pepper (*Piper nigrum* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 2, 1091-1099. <https://www.davidpublisher.com/Public/uploads/Contribute/55d3e0bd4c6a8.pdf>
- Zhang, J., Lv, J., Dawuda, M. M., Xie, J., Yu, J., Li, J., Zhang, X., Tang, C., Wang, C. y Gan, Y. (2019). Appropriate ammonium-nitrate ratio improves nutrient accumulation and fruit quality in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Agronomy*, 9(11), 1-21. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110683>
- Zu, C., Li, Z., Yang, J., Yu, H., Sun, Y., Tang, H., Yost, R. y Wu, H. (2014). Acid soil is associated with reduced yield, root growth and nutrient uptake in black pepper (*Piper nigrum* L.). *Agricultural Sciences*, 5(5), 466-473. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2014.55047>

